

# “混沌”——孕育于并反作用于物理学

程民治

(巢湖师专物理系 安徽 238000)

冉冉升起的几缕轻烟,不断喷出气流的气球摇摇晃晃地四处乱串,受阻的山间小溪流水所形成的旋涡,天空中的风云变幻,股票市场形势的骤变,等等,都是所谓的混沌现象.可以说混沌现象无时不有,无处不在.或者更确切地说,混沌系统无所不在,绝大多数系统均可出现混沌行为.

## 一、对“混沌”研究的几个历史阶段

对物理世界中频频出现的扑朔迷离、具有极丰富内涵的混沌现象的研究,始于法国著名科学家朱尔·亨利·彭加勒,他在研究天体力学中的三体问题时预感到混沌现象的存在.他以太阳系中的三体(地球、月亮和太阳)为例,证明了周期轨道的存在性,研究了周期轨道附近流的构造,发现了在所谓双曲点附近存在无限复杂精细的栅栏结构,并由此认识到三体引力相互作用就能产生出惊人的复杂行为,确定性动力学方程的某些解有不可预告性.与此同时,通过三体问题的研究,彭加勒根据哈密顿函数的数学形式,把动力学系统分为可积的和不可积的两类.这一划分十分重要,它为我们下面即将介绍的 KAM 定理的创立奠定了坚实的基础,最终使人们认识到牛顿力学实质上只是关于可积系统的理论,对于为数众多的不可积系统则毫无办法.另外,彭加勒还为现代科学家对混沌现象的研究,贡献了一系列重要的概念,如动力系统、奇异点、分叉、同宿轨道、异宿轨道等;还提供了许多卓有成效的研究方法和探索工具,如小参数展开、摄动方法、彭加勒截面法,等等.现在的稳定性理论、分叉理论,奇异性理论和吸引子理论都发源于彭加勒的早期研究.因此,人们将以彭加勒为代表的对三体问题的研究,看作是对混沌现象的初步探索期.

对混沌现象研究的次一个阶段是知识积累期.它始于 20 世纪初,延续至 50 年代.这一时期的典型事例是前苏联卓越的理论物理学家朗道对湍流现象的探索.他认为,当更多的能量进入流体时,流体中将不断出现新的频率,每一个频率都与前一个频率迭加,并且只有频率数变得足够大时湍流才会发生,这就是朗道的基本结论.在他看来湍流就是具有足够高的和独立频率数的近似周期性的流动,同时它只在具有充分自由度的系统里才会产生.这一学说受到了流体力学界的普遍关注和高度重视.后被 D·罗尔和 F·塔肯斯修正和发展.关于这个问题我们将在下文进一步讨论.特别值得指出的是,就在这个时期一系列新的数学分支学科诸如拓扑学、整体分析、微分几何、微分流形、遍历理论等相继问世;分形几何学的研究开始启动;在物理上由研究天体力学的混沌进入到探索耗散系统的混沌;生物、化学和生理学等学科中的混沌现象又陆续被关注与探讨;还有电子计算机的发明与使用.所有这一切均为混沌现象的研究及其理论的创立,奠定了坚实的数学、物理和工程应用等方面的知识基础.

从 50 年代末到 60 年代初,是对混沌现象研究的突破期.这时期的研究工作取得了两大突破性的进展;一是 KAM 定理的提出与证明;二是美国气象学家洛伦兹在天气预报模型研究中,用计算机模拟实验发现了对初条件敏感的“蝴蝶效应”.这两个重大突破迎来了对混沌现象进一步深入研究的高潮期.从 60 至 80 年代,吸引了越来越多的科学家来探索神奇的混沌现象.如 1975 年,美国数学家约克和李天岩将由确定性方程产生的随机现象命名为混沌;1977 年,第一次国际混沌会议在意大利召开等,并出现了混沌学的几个重要常数和基本概念.这标志着可与相对论和量子力学并列的新理论——混沌学已经诞生.步入 90 年代,混沌学研究又进入了一个新的时期,即混沌控制

期。这一时期依次提出了超混沌、混沌同步及控制原理与方法。目前人们只能对第一类混沌,即时间序列混沌进行有效控制,第二类混沌(空间混沌)、第三类混沌(时空混沌)、第四类混沌(产生功能混沌)的同步与控制研究还尚未开展。这是当今世界最前沿最热门的科学研究关注的焦点。

简言之,混沌是在19世纪自然科学取得空前伟大发展的基础上,以对物理学的研究为母体,通过漫长的探索逐步孕育发展起来的。它经历了混沌初步探索期、知识积累期、突破期、研究高潮期和混沌控制期五个主要阶段。

## 二、“混沌”理论的内容和研究方法

研究表明,混沌既不是简单的无序也不是简单的有序,而是一种无序中的有序,是一种高级的有序。因此,现代科学一般给混沌的定义是:确定性系统中出现的貌似不规则的有序运动,实际上是一种混沌序。现在混沌可初步理解为,在一个非线性动力学系统中,随着非线性的增强,系统所出现的不规则的有序现象。这些现象可以通过对初值的敏感依赖性、奇异(混沌)吸引子、费根鲍姆常数、分数维、遍历性等来表征。当今,经过国内外有关学者的认定,混沌理论作为物理学在20世纪所发生的第三次革命的产物,应包含如下四个内容:1.非线性动力学,这是判断混沌能否出现以及研究系统混沌动力学行为的基础;2.耗散结构理论,耗散结构系统是远离平衡的非线性区,这是混沌产生的地方;3.分形几何理论,这是认识混沌吸引子的重要数学工具;4.混沌的同步与控制,这是混沌的应用。

另外,混沌作为一门学科,当然有自己独特的研究方法。其中包括李亚普诺夫指数法、微分拓扑、符号动力学、计算机数值计算法等。与此同时,它还打破了近代科学研究遗留下的对事物一成不变的认知模式,力图从事物发展的总体和全局上观察事物的一切可能的变化。它揭示了自然界的本质特征,显示了自然界的必然性与偶然性,简单性和复杂性,有序与无序,稳定和不稳定,完全与不完全,自相似和非自相似之间的辩证关系。

## 三、“混沌”理论对物理学发展的作用

既然混沌理论最初是由于力图解决物理学中的力学问题而孕育出来的,那么,它对物理学的发展有何作用呢?随着物理学研究的深化,后来人们在它的其他分支领域,如流体力学的热对流实验、非线性振荡电路、激光工作机制、光学双稳态、固体物理的约瑟夫逊结等系统中,以及在超导研究的有关实验中都观察到混沌现象;宇宙从混沌到有序的演化、某些星体的混沌轨道、地磁场方向的混沌性质均涉及混沌;另外在由周期性变化的电压作用下的简单电路中,当电压加强到一定程度,电路就呈混沌态;甚至马丁等人还验证了在量子力学系统中也存在着混沌。这样,物理学从尺度大到天体,小到微观量子都充满了混沌。混沌一经出现就同物理学紧密地结合起来,改变了经典物理学的图景,拓宽了物理学的研究思路与方法。尤其是随着混沌同步与控制的发展,使得物理学获得了前所未有的改造自然界的新的强大工具。概括起来,混沌对物理学的巨大影响主要表现在下列五个方面:

1.混沌揭示了牛顿力学的两重性及其局限性,改变了经典物理学的世界观和时空观

如果说19与20世纪之交物理学革命所出现的两大硕果——相对论和量子力学,分别排除了牛顿的绝对时空观和打破了测量过程的完全可控性。那么,混沌则表明了决定性规律所产生的一条混沌轨道是如此的复杂,简直就像掷骰子那样随机,不可能长期预测。这意味着不能以无限高的精度在无限长时间内测量和计算连续变量。整个世界的大图景得到重新描绘,它是非线性、非稳定、不可逆和不规则的,完全决定论在这里遭到了最深刻的否定,因而牛顿动力学只适用于那些宏观的缓慢的周期或准周期的稳定运动。混沌理论的创立还使人们认识到牛顿力学具有二重性:它既是确定论的,又是随机论的。例如,有的学者通过对热力学的研究认为,热寂佯谬可能与线性观念有关,非线性混沌将不会导致热寂佯谬。此外,由耗散结构理论提出的内部时间概念,由分形理论得到

混沌吸引子的空间分维概念,又将引起对牛顿力学的时空观的新认识。

## 2. 混沌提供了物理学研究的新方法

混沌为物理学提供的研究方法,能使其所得结果更好地贴近于客观世界的本来面目。如1971年经D·罗尔和F·塔肯斯根据动力学系统的数学理论,重新解释了前面提及的朗道学说,基本上解决了湍流这一百年之谜。他们在《论湍流的本质》中提出了用混沌来描述湍流形成机理的新观点,表明只要用三个独立运动就可以产生湍流的全部复杂性;指出在湍流中规则运动包含有小尺度的混沌运动,在混沌运动中又包含着更小尺度的规则运动;并首次将他们独立于洛伦兹所发现的存在于动力学系统中的一类特别复杂的新型吸引子,命名为奇异吸引子。随着混沌理论的日趋完善与成熟,采用它来研究物理问题获得了巨大的成功。例如,电路中的混沌总是存在的,运用混沌理论来解释和分析电路中的噪声的本质,便可设计混沌电路来达到特殊的使用目的,譬如混沌加密,分形图象压缩等。又如,由于太阳黑子的活动直接影响地球气候的变化,引起旱涝等灾害,因此黑子相对数量的预报具有重要的理论意义和实际价值。近期的探索表明,太阳黑子数的活动呈现混沌现象。Casdagli用混沌理论的局部线性模型对太阳黑子数进行建模,预报结果比传统的方法(随机模型法)要好。国内学者雷鸣等人用神经网络模型辨识太阳黑子数的非线性结构,正确地预测出太阳黑子数未来的变化趋势,其长期预报正好反映了太阳黑子数呈现约以11年为周期的变化规律。

## 3. 混沌增强了物理学同其他科学的相互结合与交叉

混沌运动作为自然界的一种普遍行为,不仅存在于物理学中,而且在其他科学——生物学、生理学、医学、生态学、经济学、社会科学等中也普遍存在。这样,物理学研究混沌的方法,尤其是物理学由混沌学而促成的对复杂事物的研究方法,完全可以应用于这些科学之中。这种研究方法的特点有二,一是打破了不同学科

之间的壁垒,汇合起来,分析和探讨共同的问题;二是物理学巧妙地利用了某些门类的科学在它们各自漫长的研究烦难问题的历程中,所积累的大量事实和数据,对复杂事物进行剖析和探索。例如,在医学上,混沌运动的概念可应用于病理学,特别是在脑神经和心脏的病理学方面。众所周知,正常人的心脏是周期性的脉动,但一些心脏病患者会出现被称之为心律不齐的非周期性脉动,如心房纤维性颤动,这正是一种混沌运动,它会导致病人死亡。我们可建立一个数学模型研究其规律进而找到治疗方法。在社会经济方面,工业发达国家已把混沌理论用于金融领域。因为宏观经济也是一个非线性系统,它的发展方程含有一些控制参量,某些控制参量又与工业发展水平有关。当这些参量较小时宏观经济处在稳态;这些参量较大时,宏观经济发展很快,但也会出现周期性或准周期性的起伏;如果参量太大,就会出现混沌运动,使宏观经济产生紊乱。此外,混沌预测方法还为生态学家提供了一种新的研究途径,如用非线性预测模型在某种程度上可以反映麻疹的流行趋势,等等。可以相信,诸如光合作用过程、生命的起源和本质等世界难题,只能通过借鉴混沌所促进的非线性复杂科学的研究成果,并同数学物理模型相结合,才能最终得到解决。因此,由混沌所促进的未来交叉科学,将使物理学和其他自然科学、社会科学和社会科学之间相互交汇、渗透和融合,达到和谐统一,使得各种知识处于总体的关联之中,而这恰恰是所有专业化研究所具有的真正价值。

## 4. 混沌使决定论和概率统计理论相“对接”,从而使物理学达到了内在的融洽一致。

决定论表明:任何一个力学系统只要知道初始条件就可预测系统的未来行为。而概率统计理论则认为:受许多偶然因素的影响,系统的未来状态并不完全确定,需要用概率统计方法来描述。尽管几百年来,物理学对客观世界既作概率统计描述又进行决定论描述。但是随着物理学的深入发展,这两种描述之间的矛盾日益尖锐。例如,人们通过随机投掷硬币,根据出

现正反面的序列可以得到不可预测的随机数,这是一个典型的随机事件;但事实上硬币却又完全遵从决定性的牛顿定律。既然统计物理学中单个粒子的运动是服从决定论的,那么采用概率统计方法所必需的随机性又来自何处呢?这是统计物理学的基础性问题;另外,还有统计物理学中的等概率假设。解决这些矛盾的依据就是混沌理论中的 KAM 定理。该定理指出保守系统有可积与不可积之分,前者的运动是有规则的、遵循决定论定律的,后者的运动则表现出随机性,成为统计物理学的基础。对不可积系统, KAM 环面包围着随机层,当它的自由度少和扰动小时, KAM 环面包围的随机层测度极小可以忽略,统计物理学就不适用,而可以应用牛顿力学;反之,当系统的自由度和振动很大时,根据“阿诺德扩散”, KAM 环面逐渐减少,随机层迅速扩大,系统只具有极少数规则的规则运动而使这种运动形式退居次要地位,取而代之的是出现了大规模的混沌运动,这时统计物理学成了研究该系统的工具。由此可见,混沌理论中的 KAM 定理沟通了决定论和概率统计论,使两者达到了有机的接合。牛顿定律与概率统计论分别是混沌运动的两个近似。当混沌运动不显著时,可用牛顿运动定律来描述,当混沌运动很剧烈时,便采用概率统计论来描述。

5. 混沌将人们的科学兴趣从探求简单性引向研究和控制复杂性的道路

经典物理学研究的主要是线性的、可解析表达的、平衡态的、规则的、确定的、可逆的、可严格逻辑分析的对象,看到的主要是事物的简单性,形成了“现实世界简单性”的信念。即使是对于复杂系统的研究,一般采用的是统计平均的办法,这实质上遵循的仍然是把研究对象简单化的方法论原则。但是,当今科学的整体性正在发生深刻的富有戏剧性的变化,复杂性越来越成为各门科学发展的共同特征,物理学当然也不例外。诚如普里戈金所说,科学的兴趣正在从简单性转向复杂性。混沌研究对这一转变有着重大的推动作用。并且随着人们认识的深化,越来越多的物理学家远离了牛顿的“教

义”,把注意的中心投向“高自由度的非线性耗散系统”,即把“存在许多混沌吸引子”的复杂性事物当作当今物理学研究的重要课题,并力图寻找控制、预测、驾驭混沌所表现出的复杂性的方法。值得一提的是进入 90 年代以来,国际上混沌同步与控制有了突破性的进展,这表明了对于复杂性事物可以通过混沌同步和控制来实现。所谓混沌同步与控制,就是从理论和实验两个方面研究如何从非线性系统所产生的混沌吸引子中,按照人的主观意愿,去获取所需的各种有序态,进而达到实现其稳定的有效同步与控制目的,并在实践中加以应用。虽然混沌同步与控制的方法名目繁多,但比较有影响的是:参数微扰法-OGY 方法及其改进方法,反馈控制法,无反馈控制法,几何控制法,随机跟踪法,自适应控制法,混合同步,等等。混沌控制的机制上的共同点为:变正的李雅普诺夫指数为负值,从而实现从不稳定到稳定的转变。当前,混沌同步与控制所实现的对复杂性事物的控制,已经获得应用。如:美国海军研究实验室利用跟踪控制法,不仅实现了在很宽的功率范围内维持激光稳定运行,而且把激光的功率提高了 15 倍;美国佐治亚理工学院 ROY 在研究激光晶体倍频时,发现晶体在某些方向时,倍频激光强度将出现混沌,他采用 Hunt 偶然正比反馈混沌控制技术,有效地消除了混沌现象;利用混沌同步还可以实现秘密通讯,等等。目前对复杂性及其控制的研究才刚刚起步,随着这一研究的逐步推进和深入,它将给人类带来空前巨大的物质财富。比如:一旦应用混沌同步和控制解决了受控热核聚变中的等离子体的混沌,以及湍流等复杂的控制与约束问题,人类将获得取之不尽用之不竭的能源;另外应用时空混沌来开发混沌计算机和在量子力学中实现混沌同步与控制,将展现出无法估量的应用前景。

总而言之,孕育于物理学的混沌反作用于物理学。毋庸置疑,它必将继续对 21 世纪物理学的理论研究及其在多学科中的渗透、方法论的变革和实际应用,产生更大、更深远的影响。